

04;10

Генерация однородной плазмы в тлеющем разряде с полым анодом и широкоапертурным полым катодом

© Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, С.П. Никулин

Институт общей физики РАН, Москва

Институт электрофизики УРО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 23 декабря 1998 г.

Рассмотрены принципы построения электродных систем источников ионных пучков большого сечения на основе тлеющего разряда и предложена система с комбинированным магнитным и электростатическим удержанием быстрых электронов в широкоапертурном полом катоде и генерацией эмитирующей ионы плазмы в анодной полости. Показано, что исследованная система обеспечивает создание плазмы с близким к однородному распределением плотности тока ионной эмиссии при низких давлениях газа и может быть эффективно использована для получения ионных пучков в широком диапазоне энергий.

Применение тлеющего разряда в источниках широких ионных пучков [1,2] обеспечивает повышенную надежность и простоту эксплуатации источников, а также значительно увеличивает продолжительность генерации пучков химически активных газов по сравнению с термокатодными системами [3]. Основная проблема, возникающая при таком применении тлеющих разрядов, заключается в необходимости снижения напуска газа до уровня термокатодных ионных источников для обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка, а также снижения давления в рабочей камере для оптимизации условий ионной обработки. Решение этой проблемы достигается при использовании специфической формы тлеющего разряда с применением полого катода [4]. Однако радиальное распределение плотности плазмы в таких системах неоднородно, что затрудняет получение пучка большого сечения. Кроме того, затруднено и достижение высокой плотности тока в низкоэнергетичных ионных пучках, что связано с негативным влиянием прикатодного слоя, для которого характерны значительный (до 1 kV) перепад потенциала и большая толщина слоя, сравнимая с размером отверстий в эмиттерном электроде.

Существенное улучшение характера распределения и получение однородной плазмы в значительной части катодной полости может быть обеспечено при наложении слабых магнитных полей [5]. Разработаны и эффективно используются источники высокоэнергетических (десятки keV) широких ионных пучков с полым катодом в магнитном поле, однако для получения сильнооточного низкоэнергетического пучка необходимо уменьшать разность потенциалов $\Delta\varphi$ между эмиттерным электродом и плазмой [6,7], что затрудняет горение разряда. Уменьшение $\Delta\varphi$ может быть реализовано в другой плазменно-эмиссионной системе [7], в которой эмиттирующая ионы плазма создается в анодной полости, сообщаемой с катодной через небольшую апертуру. Однако в такой системе радиальное распределение плотности плазмы резко неоднородно, что затрудняет формирование широкого пучка. В связи с этим актуальным является изучение возможности получения в системах с полым анодом плотной и однородной плазмы.

Возникновение неоднородного распределения в анодной полости связано с тем, что электроны поступают в нее через узкое приосевое отверстие. Размер выходной апертуры полого катода может быть увеличен без нарушения устойчивости разряда, если реализовать в полой катодной наряду с электростатическим и магнитное удержание быстрых электронов. Эффективность такого комбинированного способа удержания электронов, часто используемого в цилиндрических магнетронных распылительных системах [8], связана с тем, что наложение продольного магнитного поля резко уменьшает скорость движения быстрых частиц, стартующих с цилиндрической поверхности катода, к выходной апертуре. В результате время пребывания быстрых электронов в полости возрастает и они успевают произвести в ней достаточное для поддержания самостоятельности разряда число ионизаций.

Использовавшаяся в эксперименте электродная система показана на рис. 1. В ходе экспериментов варьировались размеры полого катода 1 и диаметр его выходной апертуры d , который составлял 1, 5 и 8 см. Диаметр полого анода 2 и катода был равен 13 см, а длина составляла 6–8 см. Эмиттерный электрод 3 имел катодный или плавающий потенциал. Поток напускаемого в катодную полость газа (аргон) составлял $10\text{ см}^3/\text{мин}$, давление в вакуумной камере не превышало 10^{-2} Па. Магнитное поле ($B = 0\text{--}30\text{ мТ}$) создавалось двумя катушками 4 . Ток разряда изменялся в пределах 0.1–1 А.

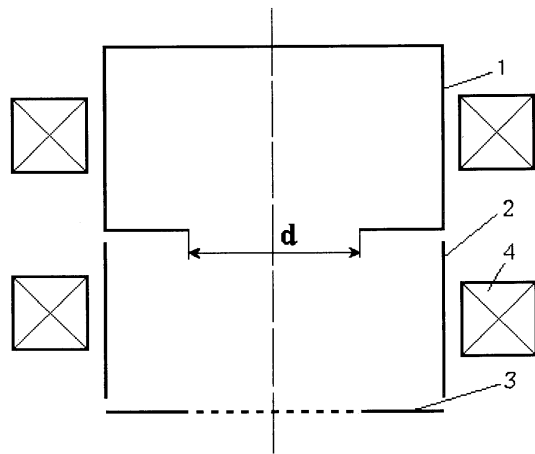


Рис. 1. Электродная система плазменно-эмиссионной системы на основе тлеющего разряда.

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением d характер радиального распределения концентрации плазмы существенно меняется. При $d = 1$ см радиальный профиль плотности тока насыщения ионов из плазмы в плоскости электрода 3 имеет резкий максимум на оси системы, а при увеличении размера апертуры на распределении появляется плато, размер которого близок к d . На рис. 2 показаны распределения, полученные при использовании катода с $d = 8$ см для различных значений разрядного тока при плавающем потенциале электрода 3. С увеличением B плотность тока ионной эмиссии j возрастает, а напряжение горения разряда U снижается (рис. 3), что ведет к значительному уменьшению цены иона в пучке. При этом характер распределения существенно не меняется, в то время как для других плазменно-эмиссионных систем увеличение B , как правило, ведет к резкому увеличению неоднородности плазмы, а в системе типа обращенный магнетрон и к уменьшению эмиссионного тока.

В экспериментах с неоднородным магнитным полем (в этом случае через катушки пропускался разный ток) было установлено, что на напряжение горения влияет преимущественно поле в катодной области, а на эффективность и характер распределения тока ионной эмиссии —

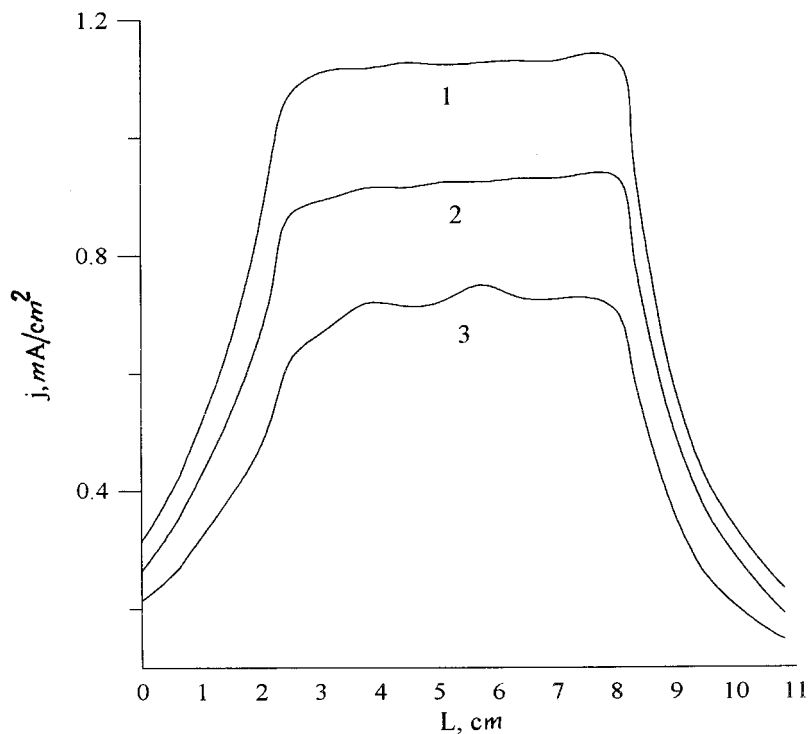


Рис. 2. Радиальные профили плотности тока эмиссии ионов при токе разряда 0.8 (1), 0.6 (2) и 0.4 А (3). Магнитная индукция $B = 10^{-2}$ Т.

величина поля в анодной области разряда, что создает возможность независимой оптимизации условий поддержания самостоятельности разряда и ионной эмиссии из плазмы.

Если электрод 3 находился под катодным потенциалом, то существенно облегчалось зажигание разряда и обеспечивалось снижение граничного давления и напряжения горения разряда (рис. 3). Плотность тока эмиссии становилась в 1.5–2 раза выше, чем при плавающем потенциале, при том же характере радиального распределения. Однако результаты расчетов и экспериментов показывают, что при получении

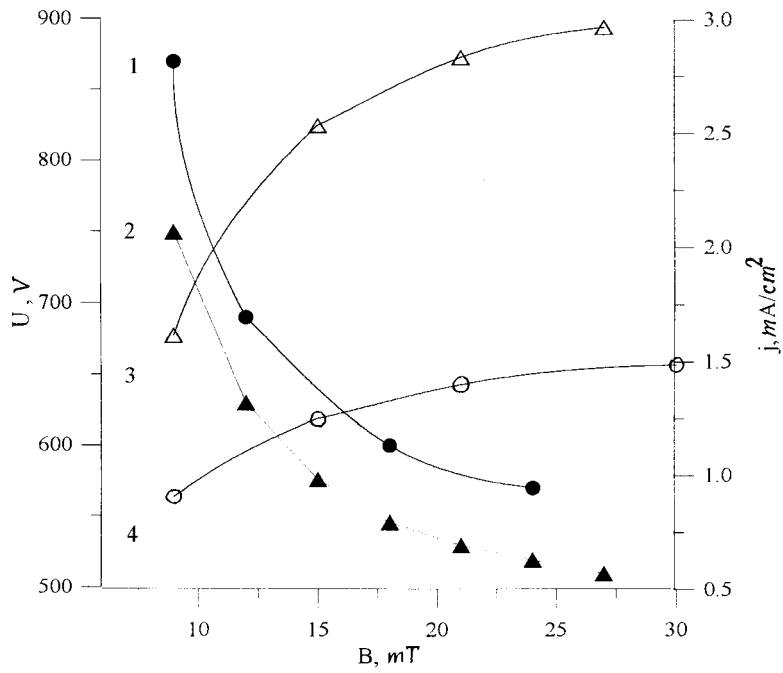


Рис. 3. Зависимости напряжения горения разряда (1, 2) и плотности тока эмиссии ионов (3, 4) от индукции магнитного поля при катодном (2, 3) и плавающем (1, 4) потенциалах эмиттерного электрода. Ток разряда 0.7 А.

низкоэнергетичного пучка (~ 1 keV) катодный слой затрудняет достижение оптимальной формы эмиссионной поверхности плазмы, что приводит к значительным потерям ионов на экранном электроде и обуславливает необходимость повышения напряженности поля в ускоряющем промежутке. Поэтому системы с катодным потенциалом эмиттерного электрода, обладающие более высокой энергетической эффективностью, целесообразно использовать в источниках ионов более высоких (десятки keV) энергий. Что же касается источников низкоэнергетичных ионных пучков, то здесь, как уже отмечалось выше, лучше использовать системы с плавающим потенциалом эмиттерного электрода, когда $\Delta\varphi$ мало.

Полученные в настоящей работе результаты делают возможным получение ионных пучков большого сечения в широком диапазоне энергий и обеспечивают существенное улучшение параметров источников ионов газов на основе тлеющего разряда.

Работа выполнена в рамках NIS-IPP проекта по контрактам N 774233 и 857153 с Брукгейвенской Национальной Лабораторией США.

Список литературы

- [1] *Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Radkovskii G.V.* et al. // Surf. Coat. Technol. 1997. V. 96. N 1. P. 81–88.
- [2] *Визирь А.Б., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 6. С. 611–614.
- [3] *Kaufman H.R., Cuomo J.J., Harper J.M.E.* // J. Vac. Sci. Technol. 1982. V. 21. N 3. P. 725–736.
- [4] *Метель А.С.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 2. С. 241–247.
- [5] *Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Nikulin S.P.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. V. 14. P. 1050–1055.
- [6] *Nikulin S.P.* // Proc of XVII ISDEIV. Berkeley, USA, 1996. V. II. P. 659–661.
- [7] *Берснев В.В., Гаврилов Н.В., Радковский Г.В.* // Тез. докл. IV Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Томск, 1996. С. 66–68.
- [8] *Thornton J.A., Penfold A.S.* Cylindrical Magnetron Sputtering. New York: Academic Press, 1978. 113 p.